

ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ НОВОЙ ЗАЩИТЫ ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В СЕТЯХ 6-35 КВ ПУТЕМ КОМБИНИРОВАННОГО ЗАЗЕМЛЕНИЯ НЕЙТРАЛИ

Костарев И.А.¹, Сапунков М.Л.¹

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Россия,
ilya_kost@mail.ru

Abstract — In this article there was research into resistor resistance is needed to ensure the sustainability of protection against ground faults, based on the control of pulsating power in 6-35 kV networks with combined neutral grounding. The research was supported by the Federal State Organization «Russian Foundation for Basic Research» within the scientific project № 13-08-96063.

Keywords: *medium voltage networks, ground faults, protection against ground faults, isolated neutral, compensated neutral, combined grounding of neutral.*

ВВЕДЕНИЕ

Функционирование разрабатываемой в ПНИПУ новой защиты сетей 6-35 кВ от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) основано на контроле изменений (приращений) пульсирующей мощности трехфазных линий [1].

Расчетные выражения для комплексных значений контролируемых защитой приращений мощности получены в виде:

- для поврежденной линии в распределительной сети (индекс линии - α):

$$\Delta \dot{P}_{\alpha} = \dot{U}_{\alpha} \Delta \dot{U}_{\phi} (d_{\Sigma} + j) \dot{\sigma}_{\alpha} m_{\alpha} \omega C_{\Sigma} + \dot{U}_{\alpha} \dot{I}_3^{(1)} \quad (1)$$

- для любой неповрежденной линии в распределительной сети (индекс линии - β):

$$\Delta \dot{P}_{\beta} = \dot{U}_{\beta} \Delta \dot{U}_{\phi} (d_{\Sigma} + j) \dot{\sigma}_{\beta} m_{\beta} \omega C_{\Sigma} \quad (2)$$

В выражениях (1), (2) приняты следующие обозначения:

\dot{U}_{α} - комплекс линейного напряжения в сети;

$\Delta \dot{U}_{\phi}$ - комплекс изменения напряжений фаз относительно земли, обусловленного возникновением замыкания на землю;

$d_{\Sigma} = g_{\Sigma} / \omega C_{\Sigma}$ - относительная активная проводимость на землю (коэффициент демпфирования), обусловленная суммарной активной проводимостью фаз всех линий на землю g_{Σ} ;

$\dot{\sigma}_{\alpha}, \dot{\sigma}_{\beta}$ - комплексные показатели асимметрии емкостей фаз относительно земли соответственно для линии α и линии β ;

m_{α}, m_{β} - показатели доли емкостей фаз относительно земли соответственно для линии α и линии β в суммарной емкости сети;

C_{Σ} - суммарная емкость фаз всех линий сети относительно земли;

ω - круговая частота сети;

$j = \sqrt{-1}$ - мнимая единица;

$\dot{I}_3^{(1)}$ - комплекс тока однофазного замыкания на землю.

Из анализа выражения (1) следует, что приращение пульсирующей мощности на поврежденной линии ΔP_{α} , которое контролируется для целей защиты от ОЗЗ, зависит от величины общего для сети тока замыкания на землю. Это является важной отличительной особенностью новой защиты от ОЗЗ. Первое слагаемое в выражении (1) зависит от общих для распределительной сети параметров C_{Σ} , d_{Σ} , а также от параметров самой поврежденной линии m_{α} и σ_{α} . При определенном сочетании этих параметров это слагаемое будет увеличивать полезный сигнал защиты. В неблагоприятной ситуации это слагаемое полезный сигнал защиты может уменьшать. В случае, когда собственные проводимости фаз на землю поврежденной линии будут равны между собой, показатель асимметрии σ_{α} будет равен нулю. Следовательно, в таком случае первое слагаемое в выражении (1) тоже будет равно нулю, а приращение пульсирующей мощности на этой линии ΔP_{α} будет прямо пропорционально току замыкания на землю в сети.

По результатам проведенных исследований [2] установлено, что в неблагоприятной для работы защиты ситуации, а именно когда поврежденная линия

будет иметь значительную протяженность (большую величину емкости фаз относительно земли) при значении показателя $m_\alpha \approx 0,9$ и при маловероятном большом отличии емкостей фаз этой линии между собой до 20% уменьшение величины полезного сигнала защиты из-за отрицательного влияния первого слагаемого в выражении (1) не будет превышать 10%. То есть, вполне допустимо считать, что минимальное значение приращения пульсирующей мощности на поврежденной линии будет соответствовать условию:

$$\Delta \dot{P}_{\Pi \alpha \min} \leq 0,9 \Delta \dot{P}_{\Pi \alpha \max} \quad (3)$$

Приращения пульсирующей мощности, контролируемые защитой на неповрежденных линиях распределительной сети в режиме ОЗЗ, по существу, являются нежелательными сигналами помех для защиты. Значение приращения мощности на некоторой неповрежденной линии β определяются согласно выражению (2).

Из сравнения выражений (2) и (1) видно, что структура выражения (2) аналогична структуре первого слагаемого выражения (1). Следовательно, если провести анализ зависимости приращения мощности на неповрежденной линии $\Delta \dot{P}_{\Pi \beta}$ аналогично выше приведенному анализу для $\Delta \dot{P}_{\Pi \alpha}$, то можно отметить следующее:

- приращение мощности на неповрежденных линиях сети в режиме ОЗЗ будут зависеть от степени асимметрии собственных проводимостей фаз линии на землю;

- при абсолютной симметрии собственных проводимостей фаз на землю показатель асимметрии σ_β будет равен нулю, следовательно, $\Delta \dot{P}_{\Pi \beta}$ тоже будет равно нулю.

По результатам исследований [2] установлено, что даже в наиболее неблагоприятной для работы защиты ситуации, а именно, когда неповрежденная линия в распределительной сети будет иметь большую протяженность (большую емкость фаз относительно земли) при значении показателя $m_\beta \approx 0,9$ и при отличии емкостей фаз линии между собой до 20% максимальная величина приращения пульсирующей мощности на неповрежденной линии не будет превышать 10% от полезного сигнала защиты на поврежденной линии. То есть, в неблагоприятной для работы защиты ситуации будет соблюдаться условие:

$$\Delta \dot{P}_{\Pi \beta \max} \leq 0,1 \Delta \dot{P}_{\Pi \alpha \min} \quad (4)$$

Соотношение сигналов, определяемых согласно (3) и (4) характеризует чувствительность новой защиты от ОЗЗ. Значения коэффициента чувствительности даже в наиболее неблагоприятных для работы защиты ситуациях могут обеспечиваться на уровне $KЧ \geq 4,5 \div 9$ и более. Следовательно, можно утверждать, что в сетях с изолированной нейтралью новая защита от ОЗЗ будет устойчиво функционировать, обеспечивая высокую надежность и селективность действия.

Однако применительно к сетям с компенсированной нейтралью, необходимо учитывать,

что величина тока замыкания на землю, как остаточного нескомпенсированного тока, может оказаться значительно меньшей, чем в сети с изолированной нейтралью. Выражение для тока ОЗЗ в случае замыкания фазы А для компенсированной сети можно представить в виде [3]:

$$\dot{I}_3^{(1)} = (Y_{B(3)\Sigma} + \lambda Y_{B,TP}) \dot{U}_{AB} - (Y_{C(3)\Sigma} + \lambda Y_{C,TP}) \dot{U}_{CA} \quad (5)$$

$$\text{где } \lambda = \frac{Y_p}{Y_p + Y_{\Sigma TP}} = \frac{g_p^2 + b_p^2 + Y_{\Sigma TP}(g_p - jb_p)}{(Y_{\Sigma TP} + g_p)^2 + b_p^2} -$$

безразмерная комплексная величина, учитывающая параметры дугогасящего реактора (ДГР) и трансформатора присоединения (ТрП);

$Y_{B(3)\Sigma}, Y_{C(3)\Sigma}$ - суммарные проводимости соответственно фазы В и С всех линий сети на землю;

$Y_{\Sigma TP} = Y_{A,TP} + Y_{B,TP} + Y_{C,TP}$ - суммарная проводимость всех фаз первичной обмотки ТрП;

$Y_{A,TP}, Y_{B,TP}, Y_{C,TP}$ - проводимости соответственно фазы А, В и С первичной обмотки ТрП;

Y_p - проводимость ДГР;

g_p, b_p - активная и реактивная проводимости ДГР.

Реактивную проводимость b_p с использованием показателя степени расстройки компенсации $\nu(\%) = (I_{C\Sigma} - I_p)/I_{C\Sigma} \cdot 100\%$ можно выразить в виде:

$$b_p = \frac{X_p}{Z_p^2} = \frac{100\omega C_\Sigma(100-\nu)}{R_p^2\omega^2 C_\Sigma^2(100-\nu)^2 + 100^2} \quad (6)$$

где Z_p - полное сопротивление реактора.

При резонансной настройке компенсации ($\nu=0$) реактора ток замыкания на землю будет минимальным $\dot{I}_3^{(1)} = \dot{I}_{OCT}$ (без учета высших гармоник). Он зависит только от активных проводимостей фаз всех линий на землю, активной проводимости реактора и ТрП.

При симметрии собственных проводимостей фаз линий на землю даже в режиме резонансной настройки компенсации новая защита будет характеризоваться абсолютной селективностью, так как согласно (2) контролируемый сигнал на любой неповрежденной линии будет равен 0.

Однако необходимо учитывать, что в реальных компенсированных сетях линии чаще всего имеют некоторую асимметрию проводимостей фаз на землю. При наиболее неблагоприятных факторах (больших значениях асимметрии проводимостей, резонансной настройке компенсации и наименьшей величине \dot{I}_{OCT} и наличии в сети, например, всего двух одинаковых линий $m_\alpha = m_\beta$) защита от ОЗЗ может оказаться на границе устойчивости функционирования.

ОПИСАНИЕ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ

В этом случае одним из вариантов повышения чувствительности защиты может быть увеличение

остаточного тока ОЗЗ за счет увеличения активной проводимости элемента заземления нейтрали. Для этого может быть применен высокоомный резистор с проводимостью g_N , который подключают параллельно ДГР, т.е. комбинированное заземление нейтрали (рис.1).

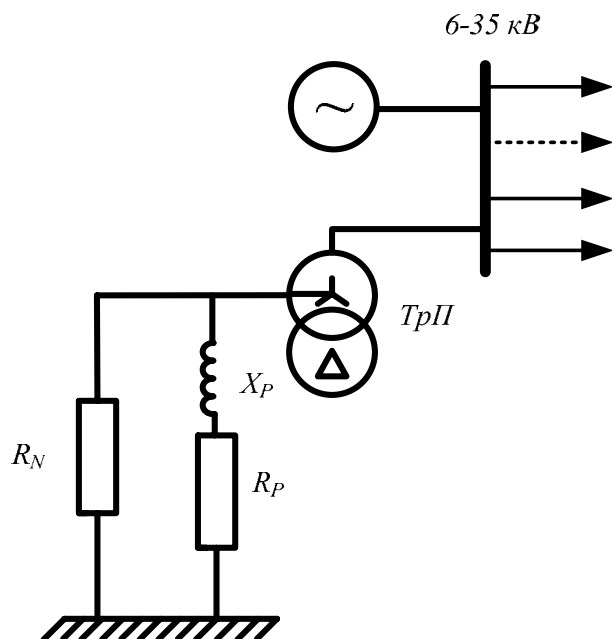


Рис. 1. Схема элемента комбинированного заземления нейтрали

Комбинированное заземление увеличивает активную проводимость на землю элемента заземления нейтрали и, следовательно, увеличивает активную составляющую тока заземления нейтрали. Это приводит к увеличению остаточного тока замыкания на землю.

В выражении (5) влияние дополнительного резистора с проводимостью g_N будет учитываться значением расчетной величины $\lambda_{\text{комб}}$:

$$\lambda_{\text{комб}} = \frac{(g_N + g_P)^2 + b_P^2 + Y_{\Sigma TP}(g_N + g_P - jb_P)}{(Y_{\Sigma TP} + g_N + g_P)^2 + b_P^2} \quad (7)$$

Известно, что увеличение остаточного тока в точке замыкания на землю ухудшает качество компенсации емкостных токов. Из этого следует, что при выборе резистора для комбинированного заземления нейтрали целесообразно, прежде всего, не допустить необоснованного увеличения остаточного тока компенсации, то есть увеличение активной составляющей тока элемента заземления нейтрали должно быть минимальным.

Выбор величины сопротивления резистора для обеспечения устойчивости функционирования новой защиты при комбинированном заземлении нейтрали основывается на учете двух следующих основных критериев:

1. Устойчивость функционирования защиты должна быть гарантированной даже в наиболее неблагоприятном для работы защиты режиме, а именно, при резонансной настройке компенсации емкостных токов ($\nu=0$).
2. Должна обеспечиваться достаточно высокая чувствительность защиты от ОЗЗ.

Считаем, что исполнительный орган защиты от ОЗЗ реализует принцип относительного сравнения приращений переменной составляющей мощности между собой всех защищаемых линий данной секции шин (принцип максиселектора). В этом варианте работы исполнительного органа защиты коэффициент чувствительности определяется в виде относительной величины приращений мощностей:

$$K_{\text{ч}} = \Delta P^* = \frac{\Delta P_{\Pi \alpha \min}}{\Delta P_{\Pi \beta \max}} \geq 1,25. \quad (8)$$

С учетом (1) и (2) запишем выражение (8) в виде:

$$\frac{|\dot{U}_{\text{Л}} \Delta \dot{U}_{\Phi}(d_{\Sigma} + j)\dot{\sigma} m_{\alpha} C_{\Sigma} \omega + \dot{U}_{\text{Л}} \dot{I}_{\text{ост}}|}{|\dot{U}_{\text{Л}} \Delta \dot{U}_{\Phi}(d_{\Sigma} + j)\dot{\sigma} m_{\beta} C_{\Sigma} \omega|} \geq 1,25. \quad (9)$$

Для удобства выполнения расчетов при обосновании величины сопротивления резистора R_N использовался относительный показатель тока через резистор по отношению к величине тока реактора:

$$n_N^* = \frac{I_{\text{RN}}}{I_P} = \frac{U_N / R_N}{U_N / Z_P} = \frac{Z_P}{R_N}. \quad (10)$$

В соответствии с выражением (9) и с учетом основных критериев обеспечения устойчивости функционирования новой защиты от ОЗЗ были проведены расчеты с целью определения влияния величины n_N^* при различных значениях модуля показателя асимметрии проводимостей фаз линий на землю $|\dot{\sigma}|$ и величины тока ОЗЗ в сети $I_{\Sigma\Sigma}$. При этом значения модуля $|\dot{\sigma}|$ задавались в пределах от 0 до 0,12, что соответствует отлачу емкостей по фазам линий от 0 до 20%; варьировалась величина тока ОЗЗ от 30 до 100 А, что соответствует реальным условиям работы электрических сетей 6-35 кВ с компенсированной нейтралью. При проведении расчетов принимались следующие условия:

1. Линейное напряжение сети $U_{\text{Л}}$ составляет 6,3 кВ;
2. ДГР имеет резонансную настройку;
3. Аргумент показателя асимметрии проводимостей фаз линий на землю был принят равным 293° , при котором будут наибольшие сигналы помех как на поврежденной, так и на неповрежденной линиях [3];
4. В качестве ТрП был взят трансформатор ТМ-630/6 с сопротивлением первичных обмоток, равным 0,35 Ом;
5. Коэффициент демпфирования сети (относительная активная проводимость сети) принят

равным минимально возможному значению, а именно 0,02 [4];

6. Переходное сопротивление в месте замыкания на землю не учитывалось;

7. Показатели $m_\alpha = m_\beta = 0,5$.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

По результатам проведенных расчетов построена зависимость n_N^* от общего емкостного тока ОЗЗ сети $I_{C\Sigma}$ (рис.2).

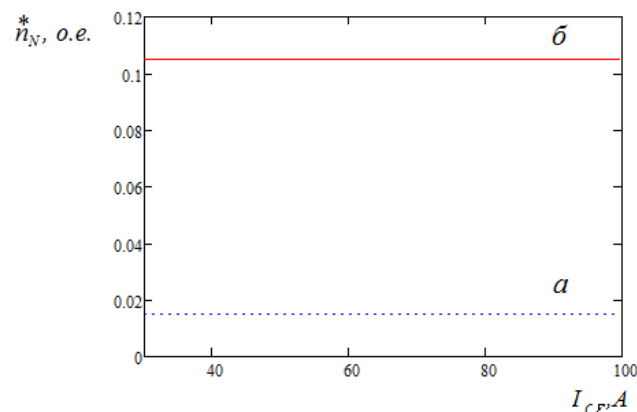


Рис.2. Зависимости n_N^* от общего емкостного тока ОЗЗ сети $I_{C\Sigma}$:

а – при $|\dot{\sigma}| = 0,04$ (для сетей с кабельными линиями);

б - при $|\dot{\sigma}| = 0,12$ (для сетей, состоящих из воздушных и кабельных линий)

По заданной величине сопротивления реактора (или величин его тока I_p), можно определить необходимую величину сопротивления резистора, обеспечивающую желаемую чувствительность защиты для любой конфигурации сети даже в режиме резонансной расстройки компенсации в зависимости от типа линий сети, при неизвестной величине показателя асимметрии (рис.2).

На основании полученных результатов разработаны рекомендации по выбору величины резистора для комбинированного заземления нейтрали и обеспечения селективной работы новой защиты от ОЗЗ:

- для сетей, содержащих только кабельные линии:

Достаточное значение $n_N^* = 0,015$. При этом согласно выражению (9) необходимая величина сопротивления резистора:

$$\begin{aligned} R_N &= Z_p / 0,015 = \sqrt{R_p^2 + X_p^2} / 0,015 = \\ &= \sqrt{(0,01)^2 X_p^2 + X_p^2} / 0,015 = 9,526 X_p = \\ &= 66,68 / \omega C_\Sigma \end{aligned} \quad (11)$$

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- для смешанных сетей, содержащих как кабельные линии, так и воздушные линии, значение $n_N^* = 0,1049$:

Аналогично определим величину сопротивления резистора:

$$R_N = Z_p / 0,1049 = 9,535 X_p = 9,535 / \omega C_\Sigma \quad (12)$$

При известной величине асимметрии проводимостей фаз линий на землю величину сопротивления резистора можно определить исходя из полученных результатов влияния $|\dot{\sigma}|$ и $I_{C\Sigma}$ (C_Σ) на R_N (рис.3).

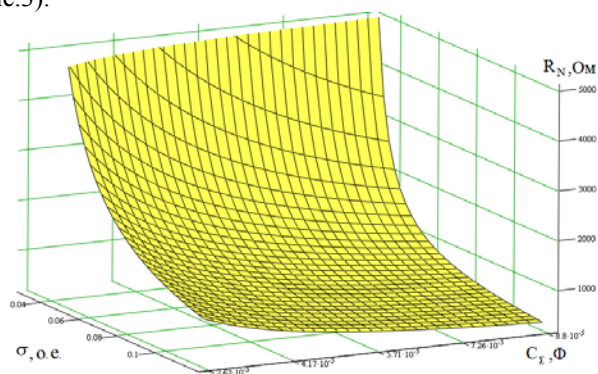


Рис.3. Зависимость R_N от модуля показателя асимметрии проводимостей фаз линий на землю $|\dot{\sigma}|$ и суммарной емкости фаз всех линий сети относительно земли C_Σ

Например, при принятых выше условиях и значении активной проводимости реактора, равной 1% от его реактивной проводимости, и токе ОЗЗ в сети 50 А значение сопротивления резистора для обеспечения селективной работы новой защиты будет составлять 690 Ом.

Неполная компенсация емкостных токов будет только увеличивать полезный сигнал защиты, повышать ее чувствительность. Так при 10-ти процентной степени расстройки компенсации ($\nu=10\%$) и тех же параметрах сети при величине резистора 690 Ом K_χ будет равен 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, правильный выбор резистора для комбинированного заземления нейтрали, позволит обеспечить устойчивое функционирование новой защиты от однофазных замыканий на землю в сетях с напряжением 6-35 кВ.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 13-08-96063.

6. Сапунков М.Л., Худяков А.А. Разработка селективной защиты от однофазных замыканий на

землю для распределительных сетей 6-10 кВ. // Энергетика. Инновационные направления в энергетике: материалы 3-й Всерос. науч.-техн. конф. - Пермь, 2010.

7. Худяков А.А., Сапунков М.Л. Влияние асимметрии проводимостей фаз линий на землю в сетях 6-10 кВ на селективность определения поврежденной линии при однофазных замыканиях // Электротехника. – 2011. – №5. – С. 2-5.

8. Костарев И.А., Сапунков М.Л., Худяков А.А. Исследование и оценка возможности применения защиты от однофазных замыканий, основанной на контроле пульсирующей мощности, в компенсированных сетях горных предприятий // Горное оборудование и электромеханика. – 2012. - №11.

9. РД 34.20.179 (ТИ 34-70-070-87) Типовая инструкция по компенсации ёмкостного тока замыкания на землю в электрических сетях 6-35 кВ // М.: СПО Союзтехэнерго, 1988.